

論文の内容の要旨

論文題目	多チャンネル表面筋電図を用いた伝播波解析に関する研究
学 位 申 請 者	小 菅 智 裕

身体運動における筋活動では、化学的作用により、神経筋接合部で活動電位が発生し、筋線維に沿って伝播することで筋全体が収縮する。筋活動による活動電位を計測したものを筋電図と呼び、医療、リハビリテーション、スポーツ科学分野等で神経筋疾患診断や筋活動評価として用いられる。近年では、皮膚表面に電極を貼付するだけで非侵襲測定が可能な表面筋電図が用いられ、電位の振幅、伝播速度、周波数特性等について解析することで、筋疲労評価や活動運動単位推定等が行われている。

従来の表面筋電図解析では、任意に解析区間を指定し、その解析区間につき、単一の振幅、伝播速度、周波数特性等が導出される。しかし、表面筋電図では、単一の運動単位の活動電位ではなく、多数の運動単位の活動電位が干渉した電位が測定される。そのため運動単位ごとに伝播状態の異なる電位が複数混在すると考えられ、解析区間が任意でかつ長いほど、単一の振幅、伝播速度、周波数特性等を導出することは、客観的で詳細な評価にならない。従って、できるだけ短く、任意ではない解析区間を設定し、個々の電位情報を調べることができれば、従来以上に客観的で詳細な評価が可能になると考える。

そこで、多チャンネル表面筋電図計測時に観察される、複数チャンネルに渡り伝播する電位波形(伝播波)に着目し、表面筋電図内に存在するすべての伝播波を抽出し、個々の特徴や構成、変動を調べることが出来れば、客観的で詳細な筋活動評価が可能となり、筋収縮メカニズムを詳細に考察できる新たな評価指標になりうると考えた。

本論文では上記の考えに基づき、筋収縮メカニズムの解明やリハビリテーション等への応用を目指し、多チャンネル表面筋電図の伝播波解析手法を提案し、種々の筋収縮状態における多チャンネル表面筋電図を詳細に解析することで、その有用性を検討することを目的とする。

本論文は以下に示す全 8 章から構成した。

第 1 章では、本論文の研究背景、目的とその位置付け、および全体の構成を記述した。研究背景で、過去の表面筋電図解析手法の研究例と具体的な問題点を挙げ、目的とその位置付けで、筋電図解析の新手法を提案する必要性を記述した。

第 2 章では、筋収縮の原理と筋電図について概説した。特に筋収縮における運動単位や筋線維のタイプやサイズの原理など、複雑な筋収縮メカニズムを記述した。また、筋電図の種類やその特徴についても記述した。

第 3 章では、提案手法と従来手法との比較を行うことで提案手法の特徴、利点について記述した。提案手法では、多チャンネル表面筋電図から 2 回ゼロクロス区間を解析単位とし、再サンプリングと伝播条件設定による定量的な伝播波判定を行う手法を記述した。従来、観察者ごとに任意の解析区間が設定され、解析区間の長さによらず、単一の伝播波特性を求めていたため、解析区間の設定により、観察者ごとに値が異なるなど客観性に問題があった。また、解析区間が長いほど解析区間に含まれる複数の伝播波特性の平均値が得られるだけとなり、詳細な解析とはならない。提案手法の利点は、個々のチャンネルの解析単位ごとに、複数チャンネルに渡る伝播波を自動抽出し、伝播波の振幅、波長、伝播速度等の解析を可能にしたことである。これにより、提案した解析単位ごとに、すべての伝播波を個別に観察することで、客観的で詳細な筋電図解析が可能であることを示した。また、計測位置の調整の簡易化や、神経筋接合部位置推定への応用も可能であることも示した。

第 4 章および第 5 章では、静的な筋収縮である等尺性収縮時の多チャンネル表面筋電図に対し、提案手法を用いた結果（第 4 章は経時的変化、第 5 章は負荷量変化）を記述した。得られた伝播波特性（伝播速度と振幅）の構成が、収縮条件（収縮時間や負荷）で変化することから、筋収縮メカニズムの詳細な解析に利用できる可能性を示した。特に伝播速度と振幅の構成に着目すると収縮時に活動する運動単位の筋線維推定が可能になることを示した。

第 6 章では、動的な筋収縮である等張性収縮時の多チャンネル表面筋電図に対し、提案手法を用いた結果を記述した。短い解析単位ごとにすべての伝播波が解析できる提案手法によって、関節角度変化により、伝播波構成や発生頻度の変化が初めて観察された。等張性収縮時では動的筋収縮により、計測位置と筋活動位置が短時間で変化すると考えられており、等張性収縮時の筋活動評価に提案手法を利用する有用性を示した。

第 7 章では、長期間の等張性収縮運動トレーニングを行った際の多チャンネル表面筋電図に対し、提案手法を用いた結果を記述した。伝播波を解析した結果、トレーニングの継続により伝播波構成が大きく変化し、使用する筋線維が特定の種類に集約されるような伝播波構成が初めて観察された。従来、筋電図からトレーニング効果を詳細に評価する手法がなかったことから、トレーニング評価に提案手法を利用する有用性を示した。

最後に第 8 章では、本論文の結果を整理し、研究成果をまとめた。さらに今後の研究の展望について記述した。本論文では伝播波に着目した多チャンネル表面筋電図の解析手法を新たに提案し、客観的で詳細な筋活動解析を実現できる可能性を示した。そして今後の展望として、伝播波構成を観察することで、筋収縮メカニズムの解析等、スポーツ科学や医療分野の研究に利用できると考え、さらに多くの収縮条件における伝播波構成を観察することで筋収縮メカニズム全体を解明する可能性を挙げた。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 小菅 智裕

審査委員主査 板倉 直明

委員 内海 彰

委員 由良 憲二

委員 椿 美智子

委員 梶本 裕之

本論文は、『多チャンネル表面筋電図を用いた伝播波解析に関する研究』と題して、以下に示す全8章から構成されている。

第1章『序論』では、本論文の研究背景、目的とその位置付け、および全体の構成が記述されている。まず、研究背景で過去の表面筋電図解析手法の研究例と具体的な問題点を挙げ、解析区間が任意で長いほど、単一の振幅、伝播速度、周波数特性等を導出することは、客観的で詳細な評価にならないことを述べている。そして、表面筋電図では、多数の運動単位の活動電位が干渉し、運動単位ごとに伝播状態の異なる電位が複数混在すると考え、できるだけ短く、任意ではない解析区間を設定し、個々の電位情報を調べることができる筋電図解析の新手法を提案する必要性が明確に記述されている。

第2章『理論』では、筋収縮の原理と筋電図について概説している。まず、筋収縮における運動単位の筋線維タイプや、サイズの原理など、複雑な筋収縮メカニズムを記述した後、筋電図の種類やその特徴についても記述している。これら概説により、筋収縮メカニズムの解明やリハビリテーション等への応用を目指すには、種々の筋収縮状態における多チャンネル表面筋電図を詳細に解析することで、提案手法の有用性を検討する必要性が明確にされている。

第3章『伝播波解析手法の提案と検討』では、提案手法と従来手法との比較を行うことで提案手法の特徴、利点について記述している。提案手法では、多チャンネル表面筋電図から2回ゼロクロス区間を解析単位とし、再サンプリングと伝播条件設定による定量的な伝播波判定を行う手法を記述している。

従来、観察者ごとに任意の解析区間が設定され、解析区間の長さによらず、単一の伝播波特性を求めていたため、解析区間の設定により観察者ごとに値が異なるなど客観性に問題があることを指摘している。

また、解析区間が長いほど解析区間に含まれる複数の伝播波特性の平均値が得られるだけとなり、詳細な解析とはならない問題なども指摘している。さらに提案手法の利点は、個々のチャンネルの解析単位ごとに、複数チャンネルに渡る伝播波を自動抽出し、伝播波の振幅、波長、伝播速度等の解析を可能とし、すべての伝播波を個別に観察することで、客観的で詳細な筋電図解析が可能であることが明確に記述されている。

第4章『等尺性収縮時における経時的変化解析に関する検討』、および第5章『等尺性収縮時における負荷変化解析に関する検討』では、静的な筋収縮である等尺性収縮時の多チャンネル表面筋電図に対し、提案手法を用いた結果（第4章は経時的変化、第5章は負荷量変化）を記述している。提案手法により得られた伝播波特性（伝播速度と振幅）の構成が、収縮条件（収縮時間や負荷）で変化することから、筋収縮メカニズムの詳細な解析に利用できる可能性を示している。特に伝播速度と振幅の構成に着目すると収縮時に活動する運動単位の筋線維推定が可能になることが明確に記述されている。

第6章『等張性収縮時の伝播波解析に関する検討』では、動的な筋収縮である等張性収縮時の多チャンネル表面筋電図に対し、提案手法を用いた結果を記述している。短い解析単位ごとにすべての伝播波が解析できる提案手法によって、関節角度変化により、伝播波構成や発生頻度の変化が初めて観察されている。等張性収縮時では動的筋収縮により、計測位置と筋活動位置が短時間で変化すると考えられており、等張性収縮時の筋活動評価に提案手法を利用する有用性が明確に記述されている。

第7章『伝播波解析による筋力トレーニング効果の評価可能性の検討』では、長期間の等張性収縮運動トレーニングを行った際の多チャンネル表面筋電図に対し、提案手法を用いた結果を記述している。伝播波を解析した結果、トレーニングの継続により伝播波構成が大きく変化したし、使用する筋線維が特定の種類に集約されるような伝播波構成が初めて観察されている。従来、筋電図からトレーニング効果を詳細に評価する手法がなかったことから、トレーニング評価に提案手法を利用する有用性が明確に記述されている。

第8章『結論』では、本論文の結果を整理し、研究成果をまとめている。さらに今後の研究の展望について記述している。本論文では伝播波に着目した多チャンネル表面筋電図の解析手法を新たに提案し、客観的で詳細な筋活動解析を実現できる可能性が結論として示されている。そして今後の展望として、伝播波構成を観察することで、筋収縮メカニズムの解析等、スポーツ科学や医療分野の研究に利用できると考え、さらに多くの収縮条件における伝播波構成を観察することで筋収縮メカニズム全体を解明する可能性を挙げている。

このように、本論文では伝播波に着目した多チャンネル表面筋電図の解析手法を新たに提案し、客観的で詳細な筋活動解析を実現できる可能性が結論として示され、さらに多くの収縮条件における伝播波構成を観察することで筋収縮メカニズム全体を解明する可能性を挙げており、筋電図による筋収縮メカニズム解析の発展に寄与できる優れた研究であると評価できる。

以上により、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。